



УДК 551.435.1 (571.55)
DOI 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295

Морфометрический анализ территории верховья р. Иркут

Безгодова О.В.

Институт Географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрено применение морфометрического анализа для изучения особенностей формирования и развития рельефа верховья р. Иркут, куда входят территории малых речных бассейнов. На основе переработанной и гидрологически корректной цифровой модели рельефа ALOS DSM получены различные морфометрические карты территории. Собраны статистические данные морфометрических и гидрологических показателей, выявлены закономерности их распределения по площади изучаемой территории, что в результате позволило выделить 4 района в пределах верховья р. Иркут и сделать выводы о факторах и закономерностях развития речной сети, определить набор представленных на территории бассейнов малых рек ярусов рельефа и геоморфологических процессов рельефообразования. На изучаемой территории преобладают среднегорный тип рельефа, крутые склоны с северной экспозицией, плоские поверхности (район Нуху-Дабан), высокие показатели индекса топографической влажности и относительного показателя эрозии. Данные факторы являются ключевыми в определении направления и объема поверхностного стока, а также интенсивности экзогенных геоморфологических процессов.

Ключевые слова: геоинформационное картографирование, малые реки, морфометрический анализ, Мунку-Сардык, район Нуху-Дабан, цифровая модель рельефа

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № АААА-А21-121012190017-5 «Морфолитогенез Внутренней Азии: теоретические, методические и практические аспекты исследования».

Для цитирования: Безгодова О.В. 2023. Морфометрический анализ территории верховья р. Иркут. Региональные геосистемы, 47(2): 282–295. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295

Morphometric Analysis of the Upper Irkut River Territory

Olga V. Bezgodova

Institute of Geography SB RAS,
Ulan-Batorskaya st., 1, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: ola.bezgodova.23@yandex.ru

Abstract. The article considers the use of morphometric analysis to study the features of the relief formation of the upper Irkut river territory, which includes the territories of small river basins. Various morphometric maps of the territory were obtained based on the revised and hydrologically correct digital elevation model ALOS. Statistical data of morphometric and hydrological indicators were collected; patterns of their distribution over the area of the study region were identified. As a result, four districts were noted within the upper Irkut river territory. The author determined a set of relief tiers and geomorphological processes of relief formation, represented in the territory of small river basins. As a result, the most important role in the development of the erosion network and the transfer of matter among morphometric parameters belongs to the absolute height, steepness and exposure of slopes, which create conditions for the distribution of the relative erosion index, topographic wetness index, plan and profile curvature, as well as a set of altitudinal tiers and differentiation of leading relief-forming processes. The higher the steepness of the slopes and the greater the absolute height, the more intense the exogenous geomorphological processes and the higher the

LS-factor. The erosion index reaches a minimum on gentle slopes in the lower relief tiers with the development of cryogenic processes, while the topographic wetness index has maximum values.

Keywords: digital elevation model, geoinformation mapping, morphometric analysis, Munku-Sardyk, Nuhu-Daban region, small rivers

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state order № AAAA-A21-121012190017-5 “Morpholithogenesis of Inner Asia: theoretical, methodological and practical aspects of the study”.

For citation: Bezgodova O.V. 2023. Morphometric Analysis of the Upper Irkut River Territory. Regional Geosystems, 47(2): 282–295. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-2-282-295

Введение

Русла рек и прилегающая к ним территория – сложная природная парагенетическая система, элементы которой характеризуются упорядоченностью входящих в ее состав элементов. От истока до устья характер движения вещества придает бассейну реки динамическое единство как в продольном, так и поперечном планах [Мильков, 1981]. Рельеф является главной составляющей водосборных бассейнов разного порядка, определяя сток воды и наносов. Для характеристики рельефа бассейнов рек необходимо определение морфометрических и гидрологических показателей, которые до развития геоинформационных технологий получали вручную с помощью топографических карт и землемерной съемки. В настоящее время наиболее простым способом получения необходимых характеристик является анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) с помощью ГИС.

Малые речные бассейны могут выступать в качестве основной территориальной единицы при районировании территорий, оценке интенсивности экзогенных геоморфологических процессов, в эколого-геоморфологических изысканиях. Весь геоморфометрический и структурный морфометрический анализ основан на исследовании бассейнов первых порядков [Алексеев, 1973; Матвеев, 2008; Waikar, Nilawar, 2014]. Малые речные бассейны требуют повышенного внимания в связи с их недостаточной изученностью, особенно на территории Байкальской рифтовой зоны [Безгодова, 2021; 2022]. Негативные изменения в структуре эрозионной сети малых рек могут привести к необратимым последствиям для всей речной системы и природных комплексов в целом. Морфометрическое моделирование процессов в водосборах с помощью анализа ЦМР широко применяется российскими и зарубежными исследователями [Zhu et al., 2013; Nabi et al., 2014; Иванов, Ермолаев, 2017; Опекунова, Бардаш, 2020].

В настоящей работе поставлена цель проведения морфометрического анализа территории верховья р. Иркут на основе комплексной обработки ЦМР. Автором решены следующие задачи:

- 1) подготовить гидрологически корректную цифровую модель рельефа по спутниковым данным ALOS Digital Surface Model (DSM);
- 2) провести разностороннюю оценку земной поверхности, в том числе в целях геоморфологического и гидрологического анализа;
- 3) автоматизировано рассчитать и картографировать стандартные морфометрические показатели по данным ЦМР.

Бассейны малых рек верховья р. Иркут, выступающие в качестве объекта исследования, характеризуются низкой картографической изученностью геоморфологических и гидрологических параметров. На данную территорию отсутствует ряд морфометрических и комплексных карт, например, уклонов, экспозиции и т. д. Интерес к исследованию этой местности повышается в связи с особенностями геоморфологического, морфологического

строения и амплитуды высот речных бассейнов. Таким образом, морфометрический анализ территории бассейнов малых рек создает предпосылки для дальнейшего многостороннего географического анализа бассейновой системы.

Объекты и методы исследований

Автором рассмотрена территория верховья р. Иркут от истока в оз. Ильчир до Мондинской котловины, куда входят бассейны малых рек: Толта, Гарган, Сусер, Бажир, Тумелик, Ара-Саган-Шулута, Саган-Шулута, Белый Иркут с притоками Мугувек и Средний Иркут, Аерхан. Данные реки выбраны в качестве ключевых и по своим характеристикам они относятся к категории малых рек (длина до 100 км, площадь бассейна до 2000 км²) [Ротмистров, 2004]. Изучаемые реки берут начало со склонов массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов и южной части Окинского плоскогорья (рис. 1). Общая площадь изучаемой территории – 965 км². Самая северная часть исследуемого бассейна р. Иркут (южная часть Окинского плоскогорья) для удобства названа районом Нуху-Дабан (по названию перевала и вершины на границе с массивом Мунку-Сардык). К району Нуху-Дабан относятся верховья Иркута с истоком в оз. Ильчир. По В.Н. Олюнину [1965] верховья р. Иркут до массива Мунку-Сардык относятся к Ильчирской котловине и Китойскому горному понижению. По В.Б. Выркину [1998] данная территория относится к южной части Окинского плоскогорья к Окинско-Иркутному и Ильчиро-Китойскому геоморфологическим районам и представляет собой область сочленения гор Прибайкалья с Северо-Байкальским нагорьем. Выделяемые два района объединены под названием Нуху-Дабан из-за схожести морфоструктурного плана территории.

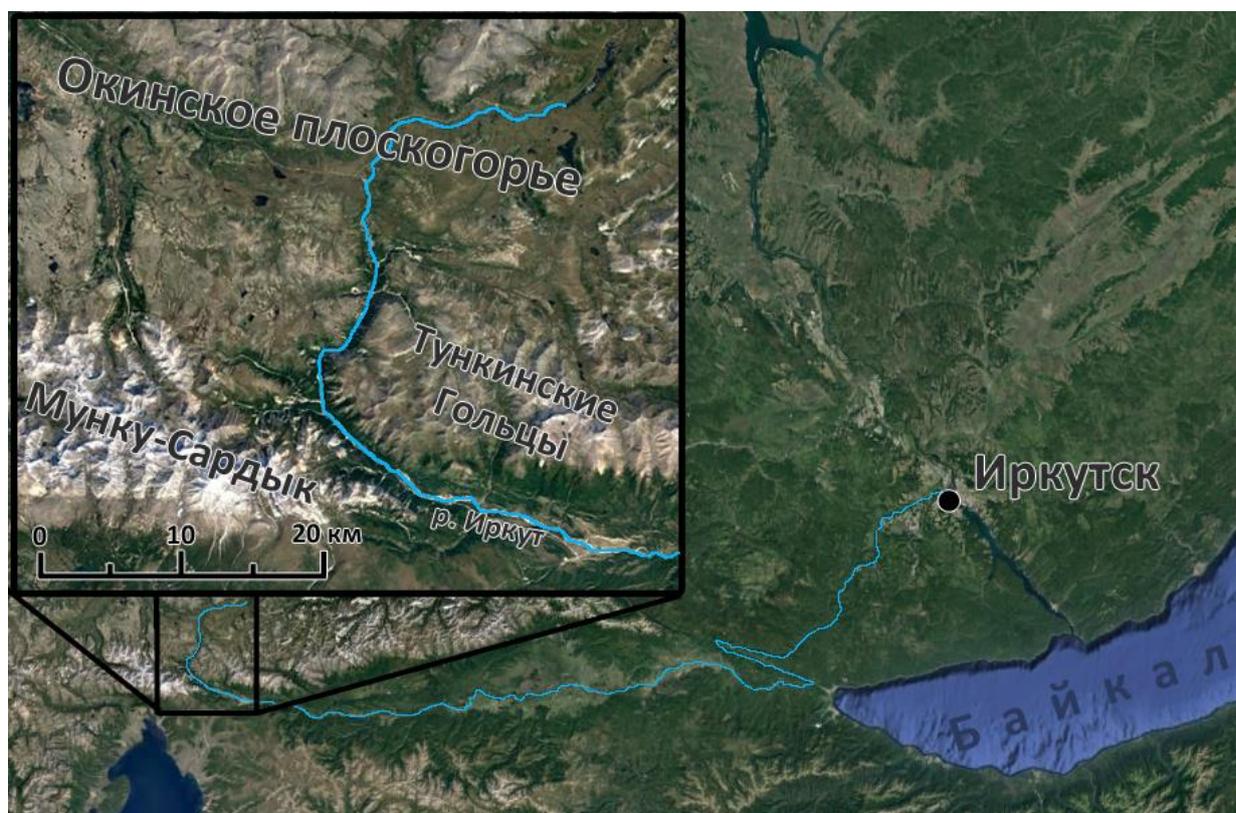


Рис. 1. Географическое положение территории исследования. Снимки Maxar Technologies. 2022
Fig. 1. Geographic location of the study area. Maxar Technologies. 2022 pictures

Район Нуху-Дабан по данным геологических карт СССР Восточно-Саянской серии¹ с юга составляют магматические гранитоидные породы среднего палеозоя, наиболее древние – докембрийские породы залегают в междуречье Оки, Китоя, Иркута (древний выступ – фундамент Гарганской глыбы). Массив Мунку-Сардык сложен среднепалеозойскими магматическими гранитоидными породами в пределах области питания древних и современных ледников (западная часть массива). Осадочные горные породы на территории массива относятся к терригенно-карбонатно-вулканогенным, пояс которых простирается к Ильчирской котловине. Западную часть Тункинских Гольцов составляет мункусардыкский комплекс среднего и верхнего протерозоя. Долины рек Бажир, Толта, Сусер и Гарган заняты отложениями четвертичной системы различного генезиса: верховья р. Бажир, среднее течение р. Гарган и р. Сусер на всем протяжении сложены аллювиальными и флювиогляциальными отложениями среднего плейстоцена; низовья р. Гарган и р. Толта занимают голоценовые аллювиальные отложения. В верховьях р. Иркут отмечены следы верхнеплейстоценового оледенения в виде сглаженных склонов и морен. Ледники спускались по долинам рек Сусер, Гарган, Толта, Тумелик. С массива Мунку-Сардык спускался Иркутский ледник вплоть до Мондинской котловины (юго-восточная часть изучаемой территории) [Олюнин, 1965].

По данным метеостанции Ильчир в пределах района Нуху-Дабан минимум температуры в январе $-20,9$ °С, максимум в июле $+10,1$ °С, за год выпадает 467 мм осадков, на теплый период приходится 85–90 % от общей суммы². Северные части бассейна р. Иркут (район Нуху-Дабан) входят в зону сплошного распространения мерзлоты с мощностью многолетнемерзлого слоя 100–500 м [Захаров, Кичигина, 2011].

Средняя протяженность русел – 13,5 км, средний уклон – 69 ‰, средняя густота речной сети – 0,37 км/км² (табл. 1). Питание малых рек верховья р. Иркут осуществляется в основном за счет дождевых осадков и талых вод. Основная их часть поступает в период весенне-летнего половодья, когда происходит одновременное выпадение осадков в процессе таяния снега и ливневых дождей. Большая часть ливневых осадков приходится на июль – август, период повышенной водоносности рек продолжается вплоть до сентября [Гидрогеология ..., 1970]. По данным Захарова и Кичигиной [2011] расход р. Белый Иркут в районе автомобильного моста (N 51°46'07,0862", E 100°42'28,7653") составляет 2,36 м³/сек. Расход воды р. Гарган в устье составляет 11,9 м³/сек, для р. Толта – 5,01 м³/сек.

Рельеф водоразделов и долин рек Толта, Гарган, Бажир и Сусер района Нуху-Дабан имеет полого-холмистый облик, с моренами в плоских и широких долинах. Выположенный экзарационный рельеф гор достигает высот 2500–2700 м. Долины рек выработаны в моренных отложениях, в верхних и средних течениях имеют небольшие уклоны днища. Слабоволнистые водоразделы с останцами указывают на следы плейстоценовых оледенений. Верховья речных долин имеют форму трогов, средние части слабо врезаны, днища заболочены. Рельеф массива Мунку-Сардык имеет альпинотипный облик, в центральной части массива с высотами 2400–3400 м находится область формирования и транзита современных и древних ледников. Перигляциальные вершины образуют цепь из остроконечных нагромождений.

¹ Геологическая карта СССР. 1969. Масштаб 1:200000. Серия Восточно-Саянская. М., Недра, 74 с.

² Научно-прикладной справочник по климату СССР. Иркутская область и западная часть Бурятской АССР. 1991. Гидрометеиздат, 605 с.



Таблица 1
Table 1

Морфометрические показатели малых рек верховья р. Иркут
Morphometric indicators of small rivers in the upper Irkut river territory

№	Название реки	Общая длина, км	Превышение высот, м	Уклон, промилле	Площадь водосбора, км ²	Густота речной сети, км/км ²	Порядок реки по Хортону [Horton, 1945], N
1	Толта	20	454	23	21	0,95	3
2	Гарган	18	601	33	117	0,15	4
3	Сусер	17	506	30	39	0,43	4
4	Бажир	10	640	63	36	0,27	3
5	Тумелик	18	657	35	65	0,27	3
6	Ара-Саган-Шулута	15	690	45	51,1	0,35	3
7	Саган-Шулута	9	1040	115	32,9	0,27	2
8	Белый Иркут	10	1030	103	57	0,17	4
9	Средний Иркут	12	1120	92	24,6	0,48	3
10	Мугувек	5	760	150	14	0,35	3
11	Аерхан	15	1020	68	31	0,48	3

Участки антропогенного преобразования бассейнов малых рек занимают незначительную площадь и приурочены к устьевым частям русел в районе автомобильной дороги «Монды – Орлик» (строительство мостов), а также днищу Мондинской котловины (п. Монды с жилыми домами, хозяйственными постройками, асфальтовыми дорогами). Долины рек Белый Иркут, Средний Иркут и Мугувек являются местом притяжения туристов.

При исследовании применялись следующие методы: математический, описательный, полевой, картографический, геоморфологический, методы дистанционного зондирования и геоинформационного картографирования. Анализ данных проводился с использованием работ по русловедению Р.С. Чалова [2008], А.В. Чернова [2009]. Исследования геолого-геоморфологического строения и климата территории верховья р. Иркут проводились для района г. Мунку-Сардык и южной части Окинского плоскогорья, куда входит район Нуху-Дабан [Коваленко и др., 2013; Выркин, Масютина, 2017]. Использованы работы по общей структуре Тункинского рифта и тектонического строения котловин Байкальского типа [Флоренсов, 1960; Щетников, Уфимцев, 2004]. Морфометрический анализ территории верховья р. Иркут на основе комплексной обработки ЦМР проводится впервые.

Используемые спутниковые данные, подготовка ЦМР и используемые морфометрические характеристики.

Автором использовались данные японской спутниковой системы *ALOS Global Digital Surface Model (DSM)*, *ALOS World 3D–30m (AW3D30)*, горизонтальное разрешение сетки 30 м (1 угловая секунда), фрагменты размером 1 x 1 градус. Снимки представляют собой 32-битную регулярную сетку, где атрибут ячейки соответствует высоте над уровнем моря в данной точке. Данные отнесены к мировой геодезической системе 1984 года – WGS–84.

Подготовка ЦМР и получение ее производных выполнялось в программе *SAGA GIS* (версия 7.8.1), оформление и анализ данных в программе *ArcGIS 10 (ESRI Inc.)*. Перед проведением морфометрического анализа для ЦМР задана проекционная система координат *UTM* для зоны 48N в *SAGA GIS* с помощью модуля *Coordinate Transformation (Grid)*. Далее проведена обрезка растра по границам изучаемой территории модулем «*Clip grid with polygon*». Последний этап обработки ЦМР – удаление «ложных впадин», которые представляют собой пустоты в цифровой модели, полученные из-за ошибок интерполяции, округления и усреднения значений высот, используя модуль *Fill Sinks (Planchon/Darboux, 2002)*. После проведенных процедур ЦМР (рис. 2) готова к проведению морфометрического анализа.

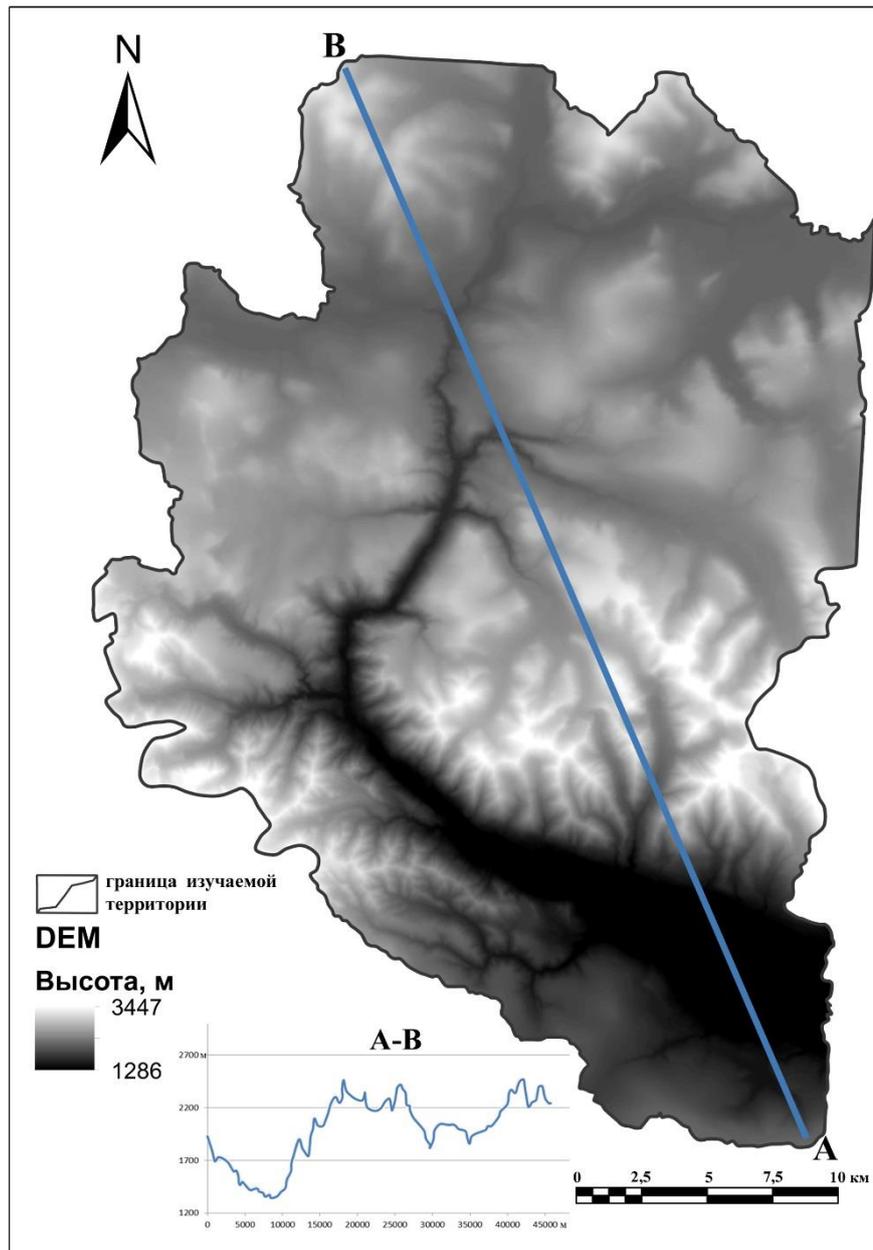


Рис. 2. Цифровая модель рельефа (DEM) верховья р. Иркут
Fig. 2. Digital elevation model (DEM) of the upper Irkut river territory

Для построения производных карт в *SAGA GIS* использовались пакеты модулей «*Terrain Analysis*»: *Terrain Classification*, *Morphometry (Curvature, Slope, Aspect* и т. д.), *Channels (Channel Network)*. При анализе рельефа территории верховья р. Иркут большое внимание уделено морфометрическим показателям: экспозиции склонов, крутизне склонов, относительному показателю эрозии, топографическому индексу влажности, плановой и профильной крутизне. Перечисленные показатели необходимы для анализа рельефа местности, визуализации и моделирования поверхностей.

Показатель абсолютной высоты необходим для определения ярусов рельефа. Вместе с крутизной склонов он указывает на интенсивность сноса рыхлого материала, а также на расстояние, преодолеваемое веществом с границ водоразделов до местного базиса эрозии (р. Иркут). Крутизна склонов также указывает на интенсивность протекания склоновых геоморфологических процессов (эрозионно-склоновый, гравитационно-склоновый, крио-



генно-склоновый). Экспозиция склонов – морфометрическая характеристика рельефа, указывающая на пространственную ориентацию элементарного склона. От нее зависит местный климат и растительность через продолжительность облучения поверхности склонов солнечными лучами (инсоляция). Так, склоны северной и южной экспозиции различаются по радиационным и термическим характеристикам, что влияет на характер и интенсивность протекания экзогенных процессов: на склонах южной экспозиции наблюдается остепнение ландшафтов, мерзлые грунты оттаивают быстрее и чаще встречаются процессы солифлюкции; на склонах северной экспозиции задерживается снеговой покров и активнее протекает нивация.

С помощью расчета коэффициентов плановой и профильной кривизны (*plan/profile curvature*) определяются основные участки с выпуклой и вогнутой поверхностью, что облегчает анализ перераспределения вещества по поверхности рельефа. Для профильной и плановой кривизны единицами измерения являются $1/m$, которые для удобства интерпретации умножаются на 100, т. е. вертикальная кривизна характеризует изменение уклона поверхности на 100 м вдоль его основного направления [Безгодова, 2021]. Эти характеристики могут быть полезны для моделирования риска оползней.

Показатель индекса топографической влажности (*Topographic Wetness Index, TWI*) – это отношение логарифма дренажной площади бассейна к тангенсу крутизны склона. Данный показатель необходим для анализа значений потенциальной влажности водосбора. Высокие показатели индекса указывают на участки аккумуляции влаги в грунтах и почве, что влияет на развитие ландшафтов, рельефа и микроклимата. Данный показатель полезен при картировании почвенного покрова или прогнозировании паводков. LS-фактор – относительный показатель эрозии [Panagos et al., 2015]. Показатель считается индикатором способности водного потока вызывать эрозию, что необходимо для оценки эрозионной сети бассейнов и расчетов эрозионного сноса материала в русла малых рек. S-фактор измеряет влияние крутизны склона, а L-фактор определяет влияние длины склона. В комбинации LS-фактор описывает влияние рельефа местности на эрозию почвы.

Результаты и их обсуждение

Перечисленные выше морфометрические показатели разделены на три группы:

- 1) показатели абсолютной высоты, крутизны склонов и экспозиции склонов;
- 2) показатели плановой и профильной кривизны (*plan/profile curvature*);
- 3) показатели индекса топографической влажности (TWI) и эрозионного потенциала рельефа (LS-фактор).

Первая группа. Абсолютные высоты изучаемой территории по данным ЦМР варьируют от 1286 до 3491 м, средняя высота – 2108 м, стандартное отклонение – 308 м. Анализ распределения высот (рис. 3) по площади исследуемого участка показал, что высоты 2050–2350 м занимают 50,8 % площади, тогда как наименьшая площадь у диапазона высот 3050–3400 (0,1 %). Такое распределение высот связано с преобладанием в структуре рельефа изучаемой территории полого-холмистого экзарационного рельефа района Нуху-Дабан, для которого характерен низкий темп тектонических движений.

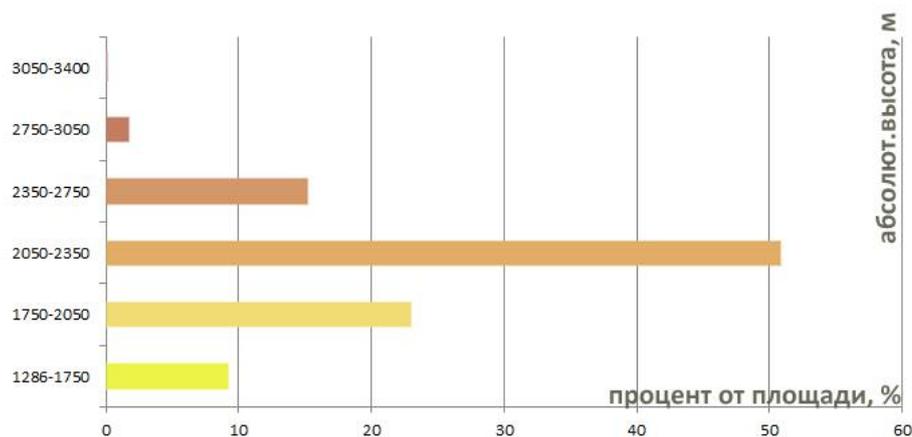


Рис. 3. Распределение высот по площади исследуемого участка
Fig. 3. The distribution of heights over the area of the study territory

В пределах исследуемой территории наибольшую площадь занимают склоны с крутизной $0-4^{\circ}$ (32 %), $4-8^{\circ}$ (15 %) и $8-15^{\circ}$ (14,4 %), что по классификации склонов О.К. Леонтьева и Г.И. Рычагова [1979] соответствует категориям от очень пологих до средней крутизны. Среднее значение – $14,6^{\circ}$ (табл. 2). Тем не менее, 5 % изучаемой территории занимают очень крутые склоны ($> 35^{\circ}$), которые приурочены к массиву Мунку-Сардык и западной оконечности Тункинских Гольцов, что предполагает широкое распространение гравитационных процессов (осыпи, обвалы, лавины и т. д.), а также благоприятные условия для перераспределения стока временных и постоянных водотоков.

Таблица 2
Table 2

Статистические параметры бассейнов малых рек верховья р. Иркут
Statistical parameters of the basins of small rivers in the upper Irkut river territory

Характеристика	Max	Min	Mean	StDev
Абсолютная высота (<i>Elevation</i>), м	3491	1286	2108	308
Крутизна (<i>Slope</i>), град.	68	0	14,6	11,5
Экспозиция склонов (<i>Aspect</i>), град.	360	0	170	106,1
Плановая кривизна (<i>Plan curvature</i>), коэф., у.е.	0,016	-0,012	0,00007	0,0013
Профильная кривизна (<i>Profile curvature</i>), коэф., у.е.	0,016	-0,016	-0,00009	0,0013
Индекс топографической влажности (<i>TWI</i>), коэф., у.е.	23,8	2,99	7,65	2,19
LS-фактор (<i>LSF</i>), коэф., у.е.	82	0,00001	5,26	4,7

Примечание. Max, Min, Mean – соответственно наибольшее, наименьшее и среднее значение, StDev – стандартное отклонение.

Что касается анализа площадного распространения экспозиций склонов, то большая их часть обращена на север (10 %), северо-восток (9,5 %) и северо-северо-восток (9,5 %), что соответствует общему уровню наклона земной поверхности от областей активного тектонического поднятия (массив Мунку-Сардык и Тункинские Гольцы) в сторону тектонически стабильного участка южной части Окинского плоскогорья. Преобладание склонов северной экспозиции определяет снос вещества в сторону района Нуху-Дабан, меньшее поступление солнечной радиации на поверхность, задержку в процессе таяния снега, меньшее испарение влаги.



Вторая группа. При расчете коэффициентов плановой и профильной кривизны (*plan/profile curvature*) для каждой ячейки раstra присваивалось значение в промежутке от $-0,016$ до $0,016$, где отрицательное значение для плановой кривизны указывает на вогнутую поверхность, значение 0 – на плоскую поверхность, положительное значение – поверхность выпуклая. Значения у показателя профильной кривизны имеют обратные характеристики: у выпуклых участков значения положительные, у вогнутых – отрицательные, нулевые значения отвечают плоским в профиле поверхностям. По результатам расчетов (см. табл. 2) средние значения профильной и плановой кривизны оказались близкими к нулю ($71,5$ % для плановой и $63,9$ % для профильной кривизны), что говорит о преобладании в рельефе плоских поверхностей (район Нуху-Дабан), на которых задерживается поверхностный сток. Далее идут поверхности с выпуклым профилем, что положительно сказывается на развитии эрозионной сети бассейна. Зоны конвергенции потока (вогнутые участки аккумуляции вещества) приурочены к склонам водоразделов, а также к днищам долин постоянных водотоков; зоны дивергенции (выпуклые участки рассеивания вещества) – склоны массива Мунку-Сардык и Тункинских Гольцов, а также склоны долин с крутыми бортами.

Третья группа. Для территории верховья р. Иркут средний показатель индекса топографической влажности (*TWI*) равен $7,65$, что относится к категории высоких значений [Cushman et al., 2008]. В целом распределение показателя *TWI* по площади занимаемого участка: низкий (до $4,6$) – $3,8$ %, средний ($4,6$ – $7,6$) – $55,8$ %, высокий (более $7,6$) – $40,4$ %. Наиболее увлажненные участки приурочены к пониженным участкам долин, к руслам временных и постоянных водотоков, а также к конусам выноса рек 2–3-го порядка (Тункинские Гольцы). Высокие показатели *TWI* указывают на хорошо развитую эрозионную сеть, а также отмечают участки с развитием временных водотоков, где развиваются флювиальные и эрозионно-склоновые процессы. В местах распространения положительных форм рельефа показатель *TWI* имеет низкие значения, здесь участки характеризуются низкой влажностью почв и грунтов, а также большой глубиной залегания грунтовых вод (выпуклые склоны массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов, вершинные поверхности).

Для исследуемого участка средний показатель *LS*-фактора равен $5,26$ (высокая категория [Cushman et al., 2008]). Большая часть территории бассейнов (73 %) относится к высоким показателям *LS*-фактора (более $1,5$), где максимумы приурочены к наиболее крутым склонам массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов, низовьям рек Бажир и Тумелик (крутые незадернованные склоны бортов долин). Низкие показатели эрозионного потенциала рельефа выявлены в днище Мондинской котловины, выровненных участках района Нуху-Дабан (Ильчирская котловина), что связано с небольшими уклонами земной поверхности. Высокие показатели *LS*-фактора указывают на источники сноса рыхлого материала в пониженные участки долин малых рек. На незадернованных склонах развивается линейная и плоскостная эрозия в местах развития почв.

В результате анализ морфометрических показателей территории верховья р. Иркут позволил выделить следующие подрайоны:

Мондинская котловина. Абсолютные высоты района тяготеют к диапазону 1310 – 1375 м ($53,7$ %); большая часть территории занята очень пологими склонами 0 – 4° ($73,3$ %), средний угол наклона $3,9^\circ$; процентное распределение экспозиции склонов примерно равномерное, максимумы у северных и северо-восточных направлений; показатели плановой и профильной кривизны указывают на вогнутый профиль рельефа; средний показатель *TWI* – $8,1$, при этом средние значения у 51 % площади территории, высокие – 48 %; средний показатель *LS*-фактора – $0,8$, при этом низкие значения характерны для $87,3$ % территории.

Массив Мунку-Сардык (бассейны рек Белый Иркут с притоками, Аерхан). Наибольшую площадь занимают абсолютные высоты 2450 – 2800 м ($24,9$ %) с крутыми

30–35° (21,9 %) и очень крутыми склонами > 35° (20,5 %), средний угол наклона 25,1°; экспозиция склонов север, северо-восток и восток (38,4 %); показатели плановой и профильной кривизны указывают на выпуклый профиль рельефа; средний показатель *TWI* – 6,4, средние значения у 67,6 % площади территории; средний показатель *LS*-фактора – 9,3, высокие значения характерны для 95,6 % площади территории.

Западная оконечность Тункинских Гольцов (бассейны рек Ара-Саган-Шулута, Тумелик, Саган-Шулута). Абсолютные высоты района тяготеют к диапазонам 2150–2400 м (25,6 %) и 2400–2650 м (23,7 %); большая часть территории занята крутыми склонами > 35° (18,4 %), средний угол наклона 21,5°; склоны обращены на юг и юго-запад; показатели плановой и профильной кривизны указывают на выпуклый профиль рельефа; средний показатель *TWI* – 6,9, при этом средние значения у 67 % площади территории; средний показатель *LS*-фактора – 8,09, высокие характерны для 91 % территории.

Район Нуху-Дабан (бассейны рек Сусер, Бажир, Толта, Гарган). Абсолютные высоты района тяготеют к диапазонам 1800–2000 м (27,9 %) и 2000–2200 м (27,4 %); большая часть территории занята очень пологими 0–4° (32,3 %) и пологими склонами 4–8° (32,7 %), средний угол наклона 9,2°; процентное распределение экспозиции склонов примерно равномерное (от 6,7 % до 10,2 %), где максимум у северных и северо-западных направлений; показатели плановой и профильной кривизны указывают в целом на выровненную поверхность рельефа; средний показатель *TWI* – 8,1, средние значения у 50,5 % площади территории; средний показатель *LS*-фактора – 3,08, при этом высокие значения характерны для 59,4 % территории.

Таким образом, морфометрия рельефа вместе с климатическими особенностями территории создают условия для высотного распределения морфологии рельефа, на развитие которого оказывают влияние флювиальные и нефлювиальные геоморфологические процессы. Эти процессы преобразуют водоразделы, склоны, элементы долин и русел малых рек, а также поставляют рыхлый материал в русла рек. В результате совместная деятельность флювиальных и нефлювиальных процессов вместе с тектоническими и геолого-геоморфологическими условиями сказывается, например, на наборе морфодинамических типов русел. Так, для западной оконечности Тункинских Гольцов в поясе нивального климата с развитием нивационных форм и следами ледниковой деятельности характерны гравитационно-склоновые и криогенно-склоновые процессы, что создает условие для развития извилистых и разветвленно-извилистых типов русел; в поясе гумидного климата на склонах средней крутизны развиты эрозионные процессы, происходит формирование конусов выноса с адаптированными извилистыми руслами. Для высокогорного пояса с высотами 2200–3400 м (табл. 3) на крутых (до 90°) склонах активно развиваются гравитационно-склоновые и криогенно-склоновые процессы, происходит активный снос (максимальные показатели *LS*-фактора) рыхлого материала на более низкие гипсометрические уровни, при этом влага на поверхности рельефа не задерживается (низкие показатели топографического индекса влажности). Таким образом, это доказывает связность элементов речных русел с морфологией рельефа и экзогенными процессами.

В результате анализ вышеперечисленных характеристик позволил выявить основные факторы развития эрозионной (речной) сети, где особо важная роль среди морфометрических показателей принадлежит высоте, крутизне, экспозиции склонов (влияние на перераспределение атмосферных осадков и их превращение в речной сток).



Таблица 3
Table 3

Соотношение морфометрических показателей рельефа с ярусами рельефа и нефлювиальными геоморфологическими процессами территории массива Мунку-Сардык и хребта Тункинские Гольцы (западная оконечность)
Correlation of morphometric indicators of relief with relief tiers and non-fluvial geomorphological processes of the territory of the Munku-Sardyk and the Tunkinskie Golcy ridge (western tip)

Крутизна, градус	LS-фактор (коэффициент, у. е.)	Ярус, высоты в метрах	Ведущий нефлювиальный геоморфологический процесс	Площадь, которую занимает процесс от общей площади яруса, %
Массив Мунку-Сардык				
21–90	27,6–82	Высокогорный пояс (3000–3491)	гравитационно-склоновый	39
			криогенно-склоновый	35
			криогенный (криогенное выветривание)	26
13–44	12,4–37,3	Среднегорный пояс (1500–3000)	криогенно-склоновый	64
			гравитационно-склоновый	36
9–32	3,1–8,9	Низкогорный пояс (1500–1440)	криогенно-склоновый	46
			криогенный	38
			эрозионно-склоновый	16
Тункинские Гольцы				
11–38	14,6–48,9	Среднегорный пояс (1500–3015)	криогенно-склоновый	73
			гравитационно-склоновый	27
6–23	2,8–7,9	Низкогорный пояс (1340–1500)	криогенно-склоновый	42
			криогенный	40
			эрозионно-склоновый	18

Данные показатели определяют выпуклый профиль рельефа, средние и высокие показатели индексов TWI и LS-фактора, что в совокупности с климатическими особенностями территории способствует развитию сети постоянных и временных водотоков, задает направление и объем поверхностного стока, а также увеличивает количество рыхлого материала, выносимого с горных территорий на выровненные участки района Нуху-Дабан и днище Мондинской котловины.

Значительную часть территории верховья р. Иркут занимают водораздельные пространства, где происходит накопление снежного покрова на склонах массива Мунку-Сардык, Тункинских Гольцов и затененных участках (склоны северной экспозиции) района Нуху-Дабан. Весной происходит задержка в процессе таяния снежного покрова и период обильного поступления поверхностного и подземного стока в русла выпадает на летние месяцы вместе с периодом ливневых дождей. При этом увеличивается водосборная поверхность и наблюдается повышение порядка водотоков, что характерно для верхних звеньев речной сети Тункинских Гольцов и массива Мунку-Сардык (водотоки 1-го порядка становятся водотоками 2–3-го порядков вследствие появления стока в системе временных водотоков).

Заключение

Впервые для территории верховья р. Иркут на базе ГИС (SAGA GIS, ArcGIS) с использованием автоматизированных процедур выполнены морфометрический анализ и расчеты по гидрологически корректной ЦМР (ALOS DSM). Расчет статистических параметров позволил выявить основные закономерности развития рельефа. В результате наиболее важная роль в развитии эрозионной сети и переносе вещества среди морфометрических показателей принадлежит абсолютной высоте, крутизне и экспозиции склонов, которые создают условия для распределения относительного показателя эрозии, индекса топографической влажности, плановой и профильной кривизны, а также набора высотных ярусов и дифференциации ведущих рельефообразующих процессов. Чем выше показатели крутизны склонов и больше абсолютная высота, тем интенсивнее протекают экзогенные геоморфологические процессы (в основном гравитационно-склоновые) и выше показатель LS-фактора. На пологих склонах в нижних ярусах рельефа с развитием криогенных процессов эрозионный показатель достигает минимума, тогда как топографический индекс влажности имеет максимальные значения.

Список литературы

- Алексеев В.Р. 1973. Наледи как фактор долинного морфолитогенеза. Региональная геоморфология Сибири, Изд-во ИГиДВ СО АН СССР: 89–134.
- Безгодова О.В. 2021. Применение морфометрического анализа для бассейнов малых рек котловин Байкальской рифтовой зоны. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 31(3): 290–300. DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300
- Безгодова О.В. 2022. Структурно-морфометрический анализ бассейнов малых рек котловин Тункинской системы. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле, 32(1): 31–41. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-1-31-41
- Выркин В.Б. 1998. Современное экзогенное рельефообразование котловин байкальского типа. Иркутск, Изд-во ИГи СО РАН, 175 с.
- Выркин В.Б., Масютина Ю.А. 2017. Геоморфологическое районирование Окинского плоскогорья (Восточный Саян). Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле, 19: 32–47.
- Гидрогеология СССР. Том 22. Бурятская АССР. 1970. М., Недра, 432 с.
- Иванов М.А., Ермолаев О.П. 2017. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и ASTER GDEM. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 14(2): 98–109. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109
- Захаров В.В., Кичигина Н.В. 2011. Роль речного стока в формировании русловых процессов высокогорной области Восточного Саяна (в верховьях рек Иркут, Китоя, Оки). В кн.: Рельеф и экзогенные процессы гор. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения доктора географических наук, профессора Л. Н. Ивановского, Иркутск, 25–28 октября 2011. Иркутск, Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2: 76–79.
- Коваленко С.Н., Мункоева Э.В., Зацепина Н.А. 2013. Климат района Мунку-Сардык (Восточный Саян). Вестник кафедры географии ВСГАО, 1–2: 15–23.
- Леонтьев О.К., Рычагов Г.И. 1979. Общая геоморфология. М., Высшая школа, 287 с.
- Матвеев Н.П. 2008. Малые реки. Вестник Московского государственного областного университета. Серия Естественные науки, 2: 18–31.
- Мильков Ф.Н. 1981. Бассейн реки как парадинамическая ландшафтная система и вопросы природопользования. География и природные ресурсы, 4: 11–18.
- Олюнин В.Н. 1965. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. М., Наука, 128 с.
- Опекунова М.Ю., Бардаш А.В. 2020. Геоморфометрический анализ рельефа бассейна реки Ия. В кн.: VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 28 сентября – 01 октября 2020. М., Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова: 514–520.



- Ротмистров В.Л. 2004. Малые реки Ярославского Поволжья. Ярославль, Изд-во ВВО РЭА, 54 с.
- Флоренсов Н.А. 1960. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л., Изд-во АН СССР, 259 с.
- Чалов Р.С. 2008. Русловедение: теория, география, практика. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М., Изд-во ЛКИ, 610 с.
- Чернов А.В. 2009. География и геоэкологическое состояние русел и пойм рек Северной Евразии. М., Крона, 682 с.
- Щетников А.А., Уфимцев Г.Ф. 2004. Структура рельефа и новейшая тектоника Тункинского рифта. М., Научный мир, 160 с.
- Cushman S.A., McGarigal K., Neel M.C. 2008. Parsimony in Landscape Metrics: Strength, Universality, and Consistency. *Ecological Indicators*, 8(5): 691–703. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.12.002
- Nabi M., Giri S., Iwasaki T., Kimura I., Shimizu S. 2014. Multi-Scale Modeling of River Morphodynamics. Conference: River Flow: 75–83. DOI: 10.1201/b17133-167
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. *Geosciences*, 5(2): 117–126. DOI: 10.3390/geosciences5020117
- Horton R.E. 1945. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydro-Physical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3): 275–370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56
- Waikar M.L., Nilawar A.P. 2014. Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: a Case Study. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research*, 2: 179–184.
- Zhu D., Ren Q., Xuan Y., Chen Y., Cluckie I.D. 2013. An Effective Depression Filling Algorithm for DEM-based 2-D Surface Flow Modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2): 495–505. DOI: 10.5194/hess-17-495-2013

References

- Alekseev V.R. 1973. Naledi kak faktor dolinnogo morfolitogeneza [Ice as a Factor of Valley Morpholithogenesis]. *Regional'naya geomorfologiya Sibiri*, Publ. IGSIDV SO AN USSR: 89–134.
- Bezgodova O.V. 2021. Application of Morphometric Analysis for Small River Basins of the Baikal Rift Zone Basins. *Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 31(3): 290–300 (in Russian). DOI: 10.35634/2412-9518-2021-31-3-290-300
- Bezgodova O.V. 2022. Structural and Morphometric Analysis of the Small Rivers Basins in the Tunka System. *Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 32(1): 31–41 (in Russian). DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-1-31-41
- Vyrkin V.B. 1998. Sovremennoe ekzogennoe rel'efoobrazovanie kotlovin bajkal'skogo tipa [Modern Exogenous Relief Formation of Baikal Type Basins]. Irkutsk, Publ. IG SB RAS, 175 p.
- Vyrkin V.B., Masyutina Yu.A. 2017. Geomorphological Regionalization of Okinskoe Highland (Eastern Sayan). *The Bulletin of Irkutsk State University. Series «Earth Sciences»*, 19: 32–47 (in Russian).
- Gidrogeologiya SSSR. Tom 22. Buryatskaya ASSR [Hydrogeology of the USSR. Volume 22. Buryat ASSR]. 1970. Moscow, Publ. Nedra, 432 p.
- Ivanov M.A., Ermolaev O.P. 2017. Geomorphometric Analysis of River Basins of the Volga Federal District Using SRTM and ASTER GDEM Data. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 14(2): 98–109 (in Russian).
- Zakharov V.V., Kichigina N.V. 2011. Rol rechnogo stoka v formirovanii ruslovykh protsessov vysokogornoy oblasti Vostochnogo Sayana (v verkhoviakh rek Irkuta. Kitoya. Oki) [The Role of River Runoff in the Formation of Channel Processes in the High-Mountainous Region of the Eastern Sayan (in the Upper Reaches of the Irkut, Kitoy, Oka Rivers)]. In: *Relyef i ekzogennyye protsessy gor [Relief and Exogenous Processes of Mountains]*. Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Doctor of Geography, Professor L.N. Ivanovsky, Irkutsk, 25–28 October 2011. Irkutsk, Publ. Institut geografii im. V.B. Sochavy Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2: 76–79.
- Kovalenko S.N., Munkoeva E.V., Zatsepina N.A. 2013. Climate of the Munku-Sardyk Region (Eastern Sayan). *Bulletin of the Department of Geography of the ESGAO*, 1–2: 15–23 (in Russian).
- Leontiev O.K., Rychagov G.I. 1979. Obshchaya geomorfologiya [General Geomorphology]. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 287 p.



- Matveev N.P. 2008. Small Rivers. Bulletin of Moscow state region university. Series Natural Sciences, 2: 18–31 (in Russian).
- Milkov F.N. 1981. Bassejn reki kak paradinamicheskaya landshaftnaya sistema i voprosy prirodopol'zovaniya [River Basin as a Paradyamic Landscape System and Nature Management Issues]. Geografiya i prirodnyye resursy, 4: 11–18.
- Olyunin V.N. 1965. Neotektonika i oledenenie Vostochnogo Sayana [Neotectonics and Glaciation of the Eastern Sayan]. Moscow, Publ. Nauka, 128 p.
- Opekunova M.Yu., Bardash A.V. 2020. Geomorfometricheskij analiz relyefa basseyna reki Iya [Geomorphometric Analysis of the Relief of the Iya River Basin]. In: VIII Shchukinskiye chteniya: relyef i prirodopol'zovaniye [VIII Shchukin Readings: Relief and Nature Management]. Materials of the All-Russian Conference with international participation, Moscow, 28 September – 01 October 2020. Moscow, Publ. Faculty of Geography, Moscow State University: 514–520.
- Rotmistrov V.L. 2004. Malye reki Yaroslavskogo Povolzh'ya [Small Rivers of the Yaroslavl Volga Region]. Yaroslavl, Publ. VVO REA, 54 p.
- Florensov N.A. 1960. Mezozojskie i kajnozozjskie vpadiny Pribajkal'ya [Mesozoic and Cenozoic Depressions of the Baikal Region]. Moscow–Leningrad, Publ. Academy of Sciences of the USSR, 259 p.
- Chalov R.S. 2008. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. Ruslovye processy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnyh rusel [Ruslovedenie: Theory, Geography, Practice. Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms of Manifestation and Conditions for the Formation of River Channels]. Moscow, Publ. LKI, 610 p.
- Chernov A.V. 2009. Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rusel i pojmv rek Severnoj Evrazii [Geography and Geocological State of Channels and Floodplains of the Rivers of Northern Eurasia]. Moscow, Publ. Krona, 684 p.
- Shchetnikov A.A., Ufimtsev G.F. 2004. Struktura rel'efa i novejschaya tektonika Tunkinskogo rifta [Relief Structure and Recent Tectonics of the Tunkinsky Rift]. Moscow, Publ. Nauchnyj mir, 160 p.
- Cushman S.A., McGarigal K., Neel M.C. 2008. Parsimony in Landscape Metrics: Strength, Universality, and Consistency. Ecological Indicators, 8(5): 691–703. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.12.002
- Nabi M., Giri S., Iwasaki T., Kimura I., Shimizu S. 2014. Multi-Scale Modeling of River Morphodynamics. Conference: River Flow: 75–83. DOI: 10.1201/b17133-167
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K. 2015. A New European Slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for Modeling Soil Erosion by Water. Geosciences, 5(2): 117–126. DOI: 10.3390/geosciences5020117
- Horton R.E. 1945. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydro-Physical Approach to Quantitative Morphology. Geological Society of America Bulletin, 56(3): 275–370. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56
- Waikar M.L., Nilawar A.P. 2014. Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: a Case Study. International Journal of Multidisciplinary and Current Research, 2: 179–184.
- Zhu D., Ren Q., Xuan Y., Chen Y., Cluckie I.D. 2013. An Effective Depression Filling Algorithm for DEM-based 2-D Surface Flow Modelling. Hydrology and Earth System Sciences, 17(2): 495–505. DOI: 10.5194/hess-17-495-2013

*Поступила в редакцию 18.01.2023;
поступила после рецензирования 09.02.2023;
принята к публикации 13.03.2023*

*Received January 18, 2023;
Revised February 09, 2023;
Accepted March 13, 2023*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Безгодова Ольга Витальевна, аспирант лаборатории геоморфологии, Институт Географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Olga V. Bezgodova, Postgraduate Student of Laboratory of Geomorphology of Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia